

【補助事業概要の広報資料】

補助事業番号 27-121
補助事業名 平成28年度 摩擦と超潤滑の原子論における非線形動力学効果の解明
補助事業者名 法政大学理工学部機械工学科教授 平野元久

1 研究の概要

摩擦は日常いたるところで遭遇する現象であるがその本質は複雑である。粗面同士の摩擦ではマクロ形状の凹凸が主要因となるのに対し、清浄平滑な面同士では原子間力が支配的となり、両面の格子定数が無理数比となる接触では摩擦が実効的にゼロになる超潤滑が実現される。超潤滑は限られたミクロ系で観測されているが、産業上機械工学にとっても極めて重要である。申請者は理学と工学の両面から摩擦の原子論研究を先駆けて推進してきた。本研究では、新たに原子レベル摩擦の動力学解明の課題を取り上げ、動摩擦のエネルギー散逸問題に原子論モデルが適用可能かどうかを解明し、新たな研究領域を摩擦研究に創成しようとしている。実験では、超高真空ノンコンタクト原子間力顕微鏡を用いた実験により、極微の摩擦力を計測する計画を継続して立案している。本研究課題の実施によって、ナノスケールの実験・理論の切磋琢磨によって摩擦・超潤滑の原子論が完成し、ミクロな摩擦の本質が深く理解され、超潤滑の発生・安定条件の理解が進展し、極小摩擦材料開発の応用展開の拡大が期待される。

このような背景の下、本研究は、原子スケール摩擦系の動力学特性を精密に評価し、摩擦と超潤滑の発生機構を理論・実験の両面から解明し、摩擦の原子論構築を強化することを目的とする。理論では、有限温度条件下、多体原子間相互作用を考慮した高精度分子動力学計算により、動摩擦におけるエネルギー散逸と超潤滑発生の機構を材料の基礎物性の立場から解明する。実験では、超高真空摩擦力顕微鏡を用いた原子スケール摩擦実験を高精度化し理論予測の実証に挑む。このため、超高真空走査型トンネル顕微鏡を活用し、弾性接触を厳密に保障した清浄表面間の摩擦力を1ピコニュートンの高精度で計測する装置を完成する。将来、高精度摩擦力顕微鏡装置を透過電子顕微鏡に組み込み、原子スケールの摩擦・超潤滑の測定と原子像直接同時観察を目指す。

本研究の独創性と意義は、有限温度下多体原子間相互作用を考慮した原子スケール摩擦系の、動摩擦エネルギー散逸における非線形力学効果と超潤滑の関係性を解明し、摩擦の原子論の全貌解明と体系化に大きな進展をもたらすことにある。本研究推進により期待される成果は、「超潤滑応用」実現の将来目標に向けて、現実系での摩擦・超潤滑の発生条件を解明し、摩擦損失の極微な潤滑材料の開発や省エネルギーを実現可能な社会基盤構築に寄与することである。

2 研究の目的と背景

本研究の目的を以下に記す。

- (1) 原子スケール動摩擦エネルギー散逸過程における非線形動力学機構として、分数調波振動、超調波振、和差調波振動、カオスの発生機構解明。

- (2) 原子間力顕微鏡技術を活用した超高真空摩擦力顕微鏡装置の改良.
- (3) 摩擦力顕微鏡を用いた原子スケールの摩擦異方性観測により摩擦の原子論の実証.

3 研究内容

(1) 理論

有限温度環境下、多体原子間相互作用を考慮した高精度分子動力学計算と摩擦特性周波数スペクトル解析により、原子スケール動摩擦エネルギー散逸過程における非線形動力学機構として、分数調波振動、超調波振動、和差調波振動、カオスの発生機構を解明する。このため、金属などの現実的摩擦系に対して、従来の対ポテンシャル平均場近似を超えて、有限温度と多体原子間相互作用を考慮した温度調節分子動力学法によって摩擦と超潤滑の発生機構を解明する。計算方法として、能勢アルゴリズムによる温度調節摩擦分子動力学計算法を開発する。

非線形動力学効果解明の基礎となる、原子論摩擦モデルの摩擦・超潤滑領域を特定する精密な摩擦相図(原子数：100個)を作成した。図1は摩擦モデルの速度(縦軸)と固体間相互作用(横軸)のパラメータ空間で原子スケール動摩擦エネルギー散逸過程の特性を示している。今後、この成果をもとに、原子運動の周波数特性を解明する。

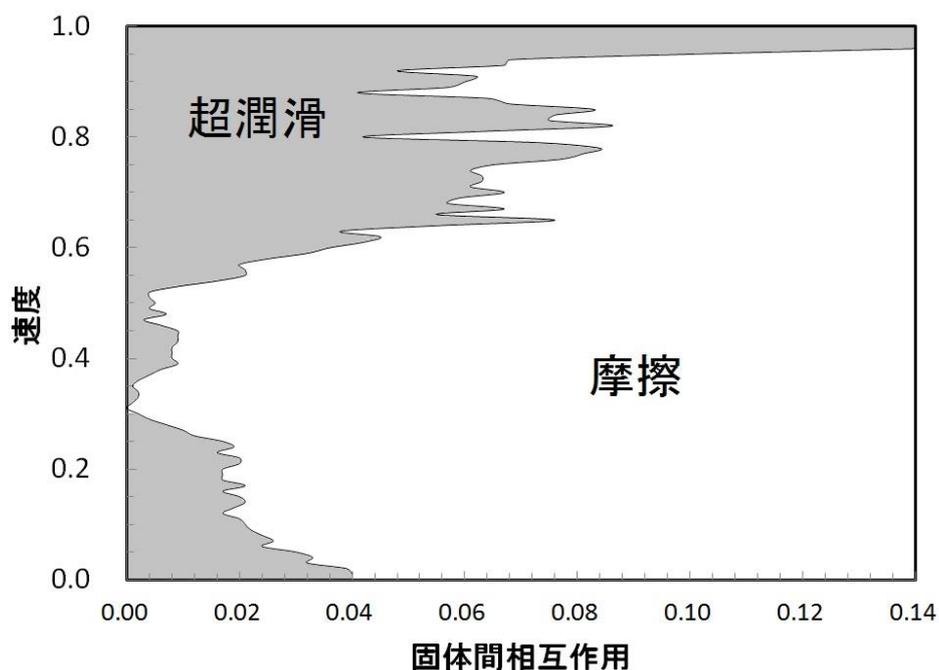


図1 F-Kモデルの摩擦相図

(2) 実験

摩擦力測定では、探針・試料表面の近接状態で、探針の共振振動数変化を検出する周波数変調検出法により高精度摩擦力測定法を開発する。図2は本事業で開発した摩擦力測定顕微鏡を示す。清浄表面間の摩擦力を測定するために、図2の挿入図に示すように探針を

試料表面に原子間距離程度に近接させ、カンチレバーを圧電材料などによって共振させて探針を試料表面に対して走査すると、探針表面と試料表面との間に働く摩擦力勾配によりカンチレバーの実効的なバネ定数が変化し、この結果共振振動数が変化する。この振動数変化は近似的に次式で与えられる。

$$\Delta\nu = -\frac{\nu_0}{2k} \frac{\partial F}{\partial x}$$

ここで、 k はカンチレバーのバネ定数である。カンチレバーの共振振動数変化 $\Delta\nu$ を検出するには周波数変調検出法を用いる。こうして、探針走査時のカンチレバーの共振振動数変化 $\Delta\nu$ を検出することにより、探針表面と試料表面間の摩擦力測定が可能になる。

原子スケール摩擦では、清浄結晶表面間の格子整合性(表面格子ミスフィット角度)に依存して摩擦が増減することが理論的に予測される(図 3 を参照)。この原子スケール摩擦異方性を精密に観測するために、試料ホルダ(図 2 参照)を圧電モータ(回転精度: 0.05°)によって回転し摩擦力を測定することにより、摩擦力の表面格子ミスフィット依存性、すなわち、原子スケール摩擦異方性の観測を目指す。

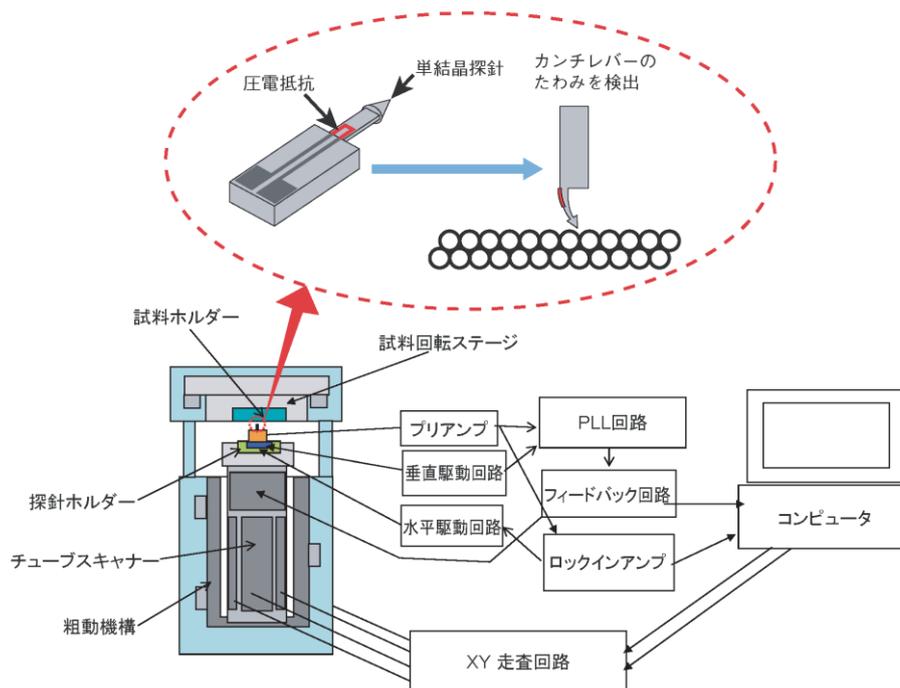


図 2 摩擦実験装置

4 本研究が実社会にどう活か

本研究は、すべり摩擦系の一对の原子間相互作用に加えて、その一对の原子間に隣接するもう一つの原子間相互作用の影響、すなわち、多体原子間相互作用を考慮することにより、現実のすべり面で超潤滑が発現する条件を解明しようとする点に獨創性を有する。今後「超

低摩擦材料設計法」などの超潤滑応用の研究を推し進めることにより、以下の学術的・社会的意義がもたらされる。

学術的には、原子どうしの相関を考慮した多体原子間相互作用を発展させた摩擦モデルを調べることにより、ミクロな摩擦の本質がより深く理解され、超潤滑の発生条件や、その安定性の理解が進展し、「摩擦の原子論」の全貌解明と摩擦理論の体系化に大きな進展をもたらすことが期待される。

社会的波及効果としては、現在までに、ごく限られた清浄で平滑な面などの摩擦系でしか実現されていない「摩擦が実効的にゼロとなる超潤滑」を、産業上有用な機械システムにおいて実現できる方法を提示することにより、摩擦損失を著しく低減する潤滑部品・潤滑材料の開発に繋がる可能性が高く、本研究成果を省エネルギー技術として活用でき、次世代の社会基盤の保障、環境保全が期待できる。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

応募者は、摩擦の発生機構の解明とともに、摩擦ゼロ、工学的には摩擦が極小となる超潤滑が現実的な摩擦系で安定に存在するのかという問題を究明し、超潤滑の工学応用に貢献したいと考えてきた。本研究は、これまでの研究成果を基盤として、現実的な原子間相互作用下で、摩擦と超潤滑の発生機構を理論的・実験的に解明することにより原子論的摩擦理論を強化し、さらに超潤滑応用として極小摩擦の潤滑材料開発に貢献するものである。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

- (1) 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2015), June 14-17, 2015, Kobe International Conference Center, Kobe, Japan. 国際会議プロシーディングス
- (2) XIN Workshop on Superlubricity: Fundamental and Applications, 18-20 October 2015, Beijing (「超潤滑：基礎と応用」に関する国際ワークショップ, 清華大学, 北京). プロシーディングス
- (3) 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, Taipei, Taiwan, 25-30 October, 2015. 国際会議プロシーディングス
- (4) International Conference on Materials Processing Technology 2016 March 28-29, 2016, Tokyo, Japan. 国際会議プロシーディングス

7 補助事業に係る成果物

(1) 補助事業により作成したもの

1. 2015 JSME-IIP/ASME-ISPS Joint Conference on Micromechatronics for Information and Precision Equipment (MIPE2015), June 14-17, 2015, Kobe International

Conference Center, Kobe, Japan. 国際会議プロシーディングス

2. XIN Workshop on Superlubricity: Fundamental and Applications, 18-20 October 2015, Beijing (「超潤滑：基礎と応用」に関する国際ワークショップ, 清華大学, 北京). プロシーディングス
3. 14th World Congress in Mechanism and Machine Science, Taipei, Taiwan, 25-30 October, 2015. 国際会議プロシーディングス
4. International Conference on Materials Processing Technology 2016 March 28-29, 2016, Tokyo, Japan. 国際会議プロシーディングス

(2) (1) 以外で当事業において作成したもの
該当事項はありません。

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 法政大学理工学部機械工学科平野研究室

(ホウセイダイガク リコウガクブキカコウガクカ ヒラノケンキュウシツ)

住 所： 〒〒184-8584

東京都小金井市梶野町3-7-2

申 請 者： 教授 平野元久 (ヒラノ モトヒサ)

担 当 部 署： 理工学部機械工学科 (リコウガクブキカコウガクカ)

E-mail： hirano@hosei.ac.jp

URL： <http://hirano-lab.ws.hosei.ac.jp>